

靜液壓高度與微流道對微流體流動時間影響之研究

郭宗祥¹ 黃立仁^{*2} 黃宣翰³

¹ 中州科技大學副教授 csgou@dragon.ccut.edu.tw

² 中州科技大學副教授 lrhwang@dragon.ccut.edu.tw

³ 東海大學 應用物理學系學生 s1002144@thu.edu.tw

摘要

本文針對微流體在重力及毛細作用力共同驅動下的流動狀態進行研究，並搭配不同間隙高度為流道實驗模型，及改變液靜壓高度和粗糙度變化來進行微流體的流動實驗，粗糙度即利用二氧化碳雷射雕刻、微輪磨加工及 SU-8 光阻製程，分別加工出細切面(粗糙度值 2.0~6.3 μm)、精切面(粗糙度值 0.25~1.6 μm)及超光面(粗糙度值 0.01~0.20 μm)之壓克力微流道，最後將實驗結果之流動時間與參數相互比較驗證。

由結果顯示液靜壓高度，微流道內流體流動時間愈快，間隙高度實驗模型隨著微流道間隙越小時，重力的驅動力對流動時間的影響則越不明顯，即在越微小間隙的流道中毛細力成為驅動液體運動的主要動力來源。最後針對不同粗糙度表面對微流體流動時間的影響作研究，應用不同重力大小來進行微流體的流動實驗，再將實驗結果相互比較驗證，以探討粗糙度對微流體流動時間的影響；結果顯示粗糙度值越大，微流體的流動速度越快，而其波前則越不穩定，且隨著重力驅動力的增加，三種不同粗糙度微流道之流動時間彼此間之差異越大。

關鍵字：毛細現象、微流道、表面粗糙度

通訊作者

姓名：黃立仁

E-mail：lrhwang@dragon.ccut.edu.tw



一、前言

1.1 微流體的應用

微流體元件及系統技術主要發展控制，感測，反應及分析微量流體；關鍵元件包括微閥、微幫浦、微流量計、微噴嘴、微流道、微混合器等，並可整合為不同功能之智慧化微型流體系統晶片；未來可應用於生物科技、攜帶式生理監測儀、環境分析儀、精密流體控制、高解析度噴墨頭及微動力系統等，對二十一世紀產品輕、薄、短、小、智慧化、多樣化的需求將產生正面的衝擊。

將微小體積的液滴滴入微流道中，由於液體-氣體-固體的介面自由能的改變，產生表面張力的效應，它會因為液體-氣體-固體的接觸面積改變而變化，可以使流體產生自發性運動，因此微流體系統本身不需外加可動元件，僅利用表面張力效應就可代替微幫浦作為流體的驅動力，利用此特性來驅動微流體的機制廣泛被運用。

主要研究領域列舉如覆晶封裝[1]~[6]之；底部充填乃是利用毛細現象(Capillary)來完成基板和晶粒之間的晶隙填膠(Underfill Dispensing)；熱管在散熱[7]~[10]運作時，工作流體在蒸發段吸收熱量使加熱管壁附近的工作流體蒸發，此時蒸發的水蒸氣便會流向壓力較低的冷凝段，接著釋放熱量後重新凝結成液態，再由毛細結構藉由毛細力流回至蒸發段而完成一個週而復始的循環；生物晶片應用[11]~[19]是指在玻璃、矽片、塑膠等材質上，利用微電子、微機械等工業技術來製成應用於生化分析的產品，其作用對象可以為基因、蛋白質或細胞組織等；它的特點是可信度及精確性高、分析速度快，所使用的樣品及試劑少；主要應用於生醫領域開發。

如李[14]所製作的微電泳晶片，內含十個相同的微電泳管道，可同時進行多種樣品的電泳分析，此晶片已成功地應用在 C 型肝炎的偵測。PBlankenstein 和 Larsen[19]所設計製作的微流體晶片，係在矽晶圓上利用半導體製程製作出微流道及儲存槽等設備，可使樣品及試劑經由驅動幫浦輸送至混合器內進行生化實驗，最後再經由流動開關完成分離。

1.2 文獻探討

關於毛細流動現象的研究可以追溯到二十世紀初期，Lucas 與 Washburn[20][21]推導出流動方程式來描述圓管中的毛細流動狀況，並且應用一範例來解釋垂直圓管內因毛細力而使液面產生上升之現象，而後續有許多研究即依據此理論作延伸與發展。在覆晶底部充填製程中，膠體經由毛細力填入晶片與基板間之間隙，以保護晶片免於熱應力的破壞，例如：Schwiebert 與 Leong[22]將間隙充填流動情形視為藉由毛細作用的黏性流體在二維的平行板間流動，並定義一滲透係數來量測流體進入平行板間隙的浸滲能力；Han 與 Wang[23]使用 Hele-Shaw 近似分析底部充填，文中分別對靜態接觸角與動態接觸角進行討論，並比對實驗與分析結果，結果顯示動態接觸角比靜態接觸角要接近實驗結果，且數值近似結果比解析結果更接近實驗結果；Ni 和 Gordon[24]使用二維 VOF (流體體積) FLUENT 模型 (自由表面模型) 探討間隙尺寸、黏滯力、表面張力和流率間的關係，並建立實驗來驗證 FLUENT 模型；Chen[25]建立有凸塊和無凸塊之兩種模型，藉由實驗驗證理論分析的結果，並討論間隙高度、凸塊密度、表面張力、接觸角及黏滯力對模型之充填時間及波前所造成的影響；Chang[26]探討不同製程參數如間隙高度、凸塊間隙大小、凸塊密度、材料性質等對模流的影響以及不同維度分析模型之結果的比較；Liu[26]探討不同製程參數如間隙高度、凸塊間距與凸塊配置等對底部充填模流的影響，並依不同製程參數建立模型進行底部充填實驗與 CAE 模流分析，將實驗結果與 CAE 模擬結果進行比較與驗證。

關於微流道中摩擦因子的研究，例如 Wu 和 Little[28]運用蝕刻方式加工矽與玻璃之微管道，來量測層流及紊流區的摩擦因子，由其結果發現不論在層流或紊流區，其摩擦因子均高於理論值，他們將此差異歸因於較高的相對表面粗糙度、不對稱的表面粗糙度及蝕刻時所產生的尺寸誤差；Harley 和 Bau[29]在梯形及矩形微流道中量測摩擦因子，其結果顯示摩擦因子乘雷諾數之值由 49 變化至 512，明顯的與傳統理論值 48 有很大的差異；Mala 和 Li[30]探討微管道內水流動現象，量測管內的壓力降與流率來分析其流動特徵，經由實驗與理論作比較，發現在較低雷諾數時，其壓力梯度的差異並不大，但隨著雷諾數的增加，兩者間的差異越大，且實驗結果均大於理論值，依其推斷此現象的原因可能為提早由層流區進入紊流區，或是因為微管道內表面粗糙度的影響，故而提出粗糙黏度(Roughness-Viscosity)模型來解釋其實驗結果，即粗糙度將使靠近壁面的邊界層動量轉移增加，而增加的動量轉移可由粗糙黏度來說明，此粗糙黏度在靠近壁面時其值較大，而在微管道的中間處，其值接近零，另外由實驗結果得知此粗糙黏度亦與雷諾數成正比；Pfahler[31]使用氮、丙醇及矽油作為工作流體來量測微流道內層流的摩擦因子，結果顯示三種流體之量測值均低於理論值，且雷諾數與摩擦因子的乘積並非常數；Yu[32]使用氮及水當作工作流體，在 19.6 至 102 μm 的管徑內從事實驗，結果顯示不論在層流或紊流區，雷諾數與摩擦因子的乘積均明顯低於理論值 64；Peng 與 Peterson[33]使用水力直徑為 0.133~0.367mm 的矩形微流道來量測水的摩擦因子或流動阻力，由實驗結果可得摩擦阻力均小於傳統理論值，且發現在微流道中比一般管路更早達到紊流區；接著 Weilin 將粗糙黏度概念應用在梯形微流道中，建立實驗模組來量測壓力降，並與其推導之粗糙黏度公式作比較，由結果顯示兩者間之趨勢極為吻合。另外有關粗糙度方面的研究亦有許多文獻探討表面微結構對接觸角及表面附著現象之影響，如 Wenzel[34]提出有關粗糙表面時接觸角須作適當的修正，即若接觸之表面為一粗糙表面，此時 Young's 方程式須加入粗糙因子來作修正，以代表粗糙表面與流體的接觸角，其結果為當表面為親水性時，若表面越粗糙，其親水性程度越大，當表面為疏水性時，若表面越粗糙，其疏水性程度越大；接著 Cassie[35]針對複合表面亦提出 Cassie model，即在微流體流動過程中，對於較粗糙表面的情況，並無法使流體全部塌陷而形成完全接觸，造成部份液體懸浮於氣體上面，此時須將 Wenzel 方程式作修正，即同時考慮接觸與懸浮部份之現象來計算接觸角。

本研究建立一實驗模組進行實驗何種參數；本研究使用精密全自動平面磨床 加工壓克力材料，製作出精度極高的微流道，然後將其貼緊於底板上並與儲液槽接合成實驗模組，在室溫(25°C)狀態下進行流動實驗，同時利用高畫質影像顯微鏡(CCD 影像感測器)透過視訊介面將實驗過程紀錄下來。

二、實驗方法與步驟

2.1 材料性質

本文使用矽油(Silicone Oil) MS1000 作為流動實驗之材料，此材料具有流動性佳與不會硬化的優點；矽油的密度、黏度與表面張力的數值是由材料商 GE Toshiba Silicones Co., Ltd. 所提供，如表 2-1 所示；另外藉由表面張力計(Drop Shape Analysis System DSA Mk2)作滴定實驗，可量測矽油在壓克力底板上之接觸角變化，如圖 2-1 所示。



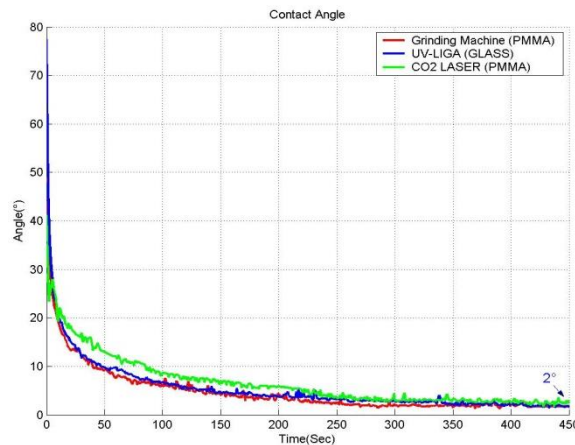


圖 2-1 不同粗糙度表面之接觸角變化量測值

表 2-1 矽油材料性質

Physical properties	Descriptions
Density ($\rho(g/cm^3)$)	0.97
Viscosity ($\eta(Pa \cdot s)$)	0.97
Surface tension ($\sigma(N/m)$)	0.0212
Contact angle ($\theta_0(^{\circ})$)	56.8
Contact angle ($\theta_e(^{\circ})$)	2

2.2 實驗模型

在每個不同間隙高度模型的實驗過程中，儲液槽內的矽油均添加至不同高度，以觀察液靜壓高度重力大小對流動的影響，儲液槽內矽油所設定的高度 H 分別為 0mm、1mm、2mm、3mm、4mm 及 5mm；為了確保實驗結果的準確性與再現性，各種設定條件皆進行 5 次以上的實驗，同時以影像顯微鏡連結至電腦紀錄整個實驗過程，為實驗過程中電腦螢幕經由軟體即時顯現矽油在微流道內的流動狀態，為微流體流動狀態的放大圖形，可配合軟體內的計時器擷取不同時間點的對應流動距離。

實驗模型如圖 2-2 所示，其中實驗模型之尺寸設計如圖 2-3(a)所示，外形邊長為 30mm × 30mm 之壓克力模型，模型中央部份由精密磨床加工出一深度 h 之流道，整個微流道之尺寸為 30mm × 20mm × h，而為比較不同間隙高度之流動狀況，故設計了四種不同間隙高度 h 之模型，分別為 0.20mm、0.15mm、0.10mm 與 0.05mm，圖 2-3 (b)為壓克力微流道實體圖，另外表 2-2 為四種微流道模型部分詳細之尺寸。

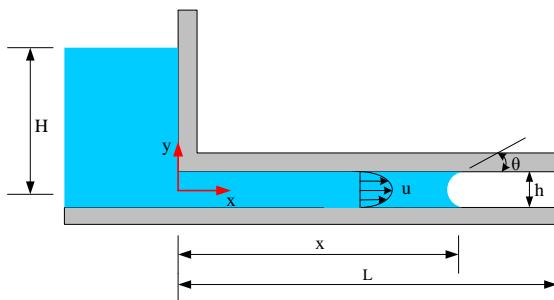
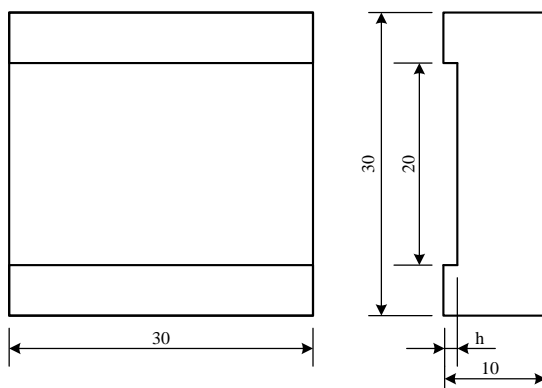
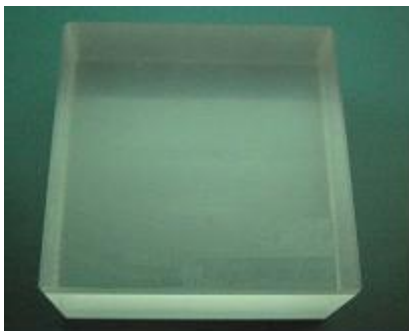


圖 2-2 微流體流動示意圖



(a) (單位：mm)



(b)

圖 2-3 (a)微流道模型尺寸示意圖；(b)壓克力實驗模型圖

表 2-2 微流道之實驗模型設計尺寸

Parameters	Descriptions
Hydraulic (H, mm)	0, 10, 20, 30, 40, 50
Gap(h, mm)	0.2, 0.15, 0.1, 0.05
Roughness(Ra, μm)	0.09, 0.7, 5.27



2.3 微流道粗糙度

本實驗選用二氧化碳雷射(GCC Laser Pro - L-25 型) 雕刻方式製作 PMMA 微流道，微輪磨加工製程選用 600#粒度之鑽石磨輪(福裕磨床 FSG-1632ADII 型)，來進行微輪磨加工，以使加工精密度達到微米等級。SU-8 光阻製程選用 UV-LIGA 製程並塗佈 SU-8 光阻材料來製作微流道；SU-8 負光阻材料主要的成分有高分子、溶劑和感光劑，其固化後之化學穩定性佳且具有良好之機械性質，所以十分適合作為元件之結構體。本研究量測表面粗糙度時採用之取樣法為方格型(Rectangular grid)分割法，藉由多區塊且全面性的量測，取得其量測的總平均值，求得模型整體之平均粗糙度值；經由三豐 MITUTOYO SJ-401 型表面粗度計，所得不同加工法微流道之表面粗糙度量測值如表 2-3 表示。

表 2-3 不同加工法微流道之表面粗糙度量測值

Manufacturing Method	加工面粗糙度等級 (μm)	R_a (量測值) (μm)
CO ₂ Laser	細切面	2.0~6.3
Micro-Grinding	精切面	0.25~1.60
UV-LIGA, SU-8	超光面	0.01~0.20

2.4 實驗步驟

實驗裝置如圖 2-4 實驗器材配置圖所示，包括：水平儀、點膠機(Toolwide 500，Everwide Chemical Co.)、底板($10 \times 10 \text{cm}^2$)、儲液槽、壓克力微流道模型外型尺寸($30 \times 30 \text{mm}^2$)、影像顯微鏡(CCD 影像感測器)、GA-VD001 影像擷取卡、電腦。

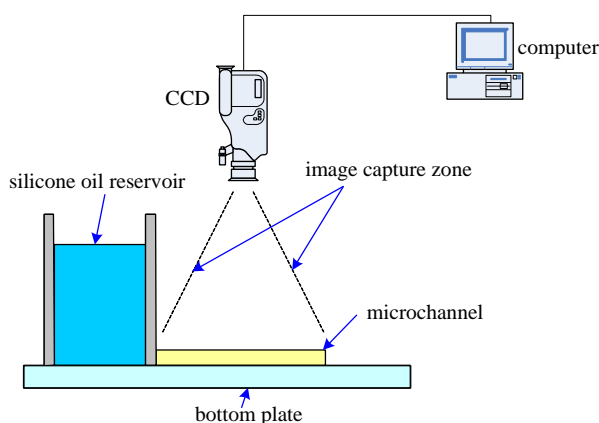


圖 2-4 微流道實驗裝置圖

實驗均在室溫(25°C)的狀態下進行，將實驗模型清洗乾淨之後放置於底板上，並把實驗模型凹槽之中心對齊儲液槽液體出口之中心，再依照實驗所需之不同重力高度(即儲液槽內矽油高度 H)將實驗液體矽油填入儲液槽中，接著將活動擋板向上抽出，使矽油進入微流道內，以進行微流體流動實驗。

三、結果與討論

3.1 靜液壓高度之影響

在本實驗中，由於考慮儲液槽高度 H 為定值與隨微流體流動而變化的理論計算結果，兩者之流動實驗過程中，儲液槽內矽油高度的降低，對重力驅動力的影響微結果與實驗作相互比較驗證；由圖 3-1 中可知隨著儲液槽內矽油高度的增高，所需的流動時間越少，且隨著微流道間隙高度越大，矽油的流動速度越快，即流動完成所需的時間越少；可知在微流道高度 $h=0.2\text{mm}$ 時，儲液槽內矽油高度 $H=5\text{cm}$ 之流動時間為矽油高度 $H=0\text{cm}$ 的 31.85%，而在微流道高度 $h=0.05\text{mm}$ 時，儲液槽內矽油高度 $H=5\text{cm}$ 之流動時間為矽油高度 $H=0\text{cm}$ 的 59.74%，由此兩數據比較可知，當微流道高度 h 越小時，則重力驅動力對微流體流動時間的影響程度相對的變小，即在越微小的流道中，毛細力將成為驅動微流體運動的主要動力來源，圖 3-2 顯示 $h=0.2\text{mm}$ 和 $H=0\text{mm}$ 時之流動波前型態，周圍受毛細作用影響，中央波前影響之流動狀況。

對於不同間隙高度 h 之微流道，儲液槽內矽油重力與矽油在微流道內之毛細力對流動時間的影響程度，儲液槽內矽油重力與矽油在微流道內之毛細力對流動時間的影響項目。

圖 3-3 結果比較可知隨著微流道的間隙高度 h 值越小，重力驅動力對流動時間的影響力越小，若欲使重力與毛細力具有相同的權重，儲液槽內液面高度僅須升愈高，若欲使重力與毛細力具有相同的權重，則須將儲液槽內液面高度升高；當微流道間隙高度越小時，欲使用外加的動力來驅動微流體運動則越困難。

由結果可得知四種間隙高度之微流道模型之實驗和理論兩條曲線均極為趨近，即微流體從進入微流道內至流動完成之整個流動過程中，理論預測流動時間與實驗結果極為吻合。

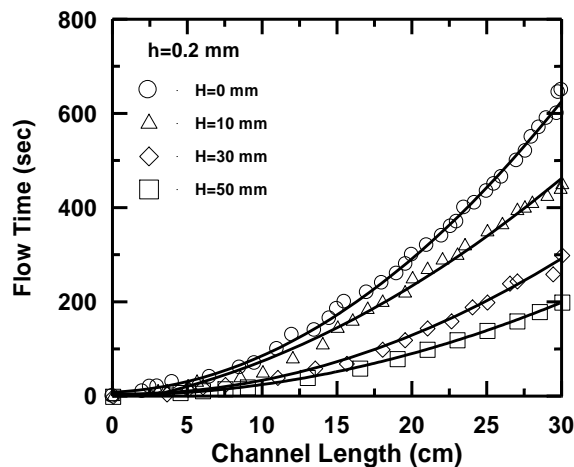


圖 3-1 不同液靜壓高度下，重力對微流道流動時間關係



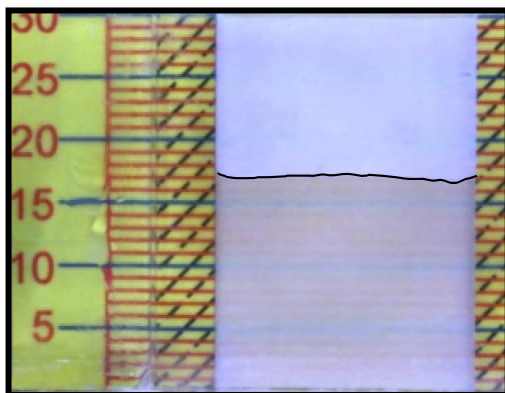


圖 3-2 間隙高度 $h = 0.20 \text{ mm}$ 時之流動波前(波前流動單位為 mm)

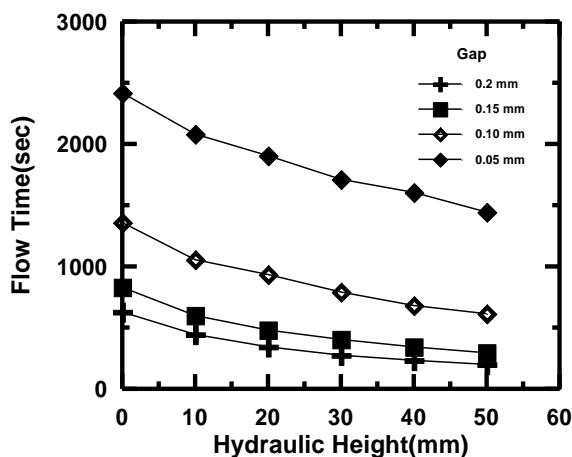


圖 3-3 不同微流道間隙和液靜壓高度時對微流道流動時間影響

3.2 微流道間隙之影響

實驗模型之四種間隙高度分別為 0.20mm 、 0.15mm 、 0.10mm 與 0.05mm ，而每個模型於實驗時均設定不同的矽油高度，分別為 0mm 、 1mm 、 2mm 、 3mm 、 4mm 與 5mm ，以分析探討不同重力大小對流動的影響，底下將針對理論計算與實驗結果間之關係作分析比較。

圖 3-4 顯示為考慮儲液槽高度 H 為定值與隨微流體流動而變化的理論計算比較結果，由圖中可知兩者之間僅有些微的差異，其中差異最大的發生在微流道高度 $h=0.2\text{mm}$ ，儲液槽初始設定高度 $H=10\text{mm}$ 時，兩者之間有 4 秒的差距，在此條件下流動完成所需之矽油體積為 $1.2 \times 10^{-7} \text{m}^3$ ，此時儲液槽內矽油高度下降了 0.462mm ；而隨著儲液槽內矽油的初始設定高度越大，矽油高度的下降量對整體重力驅動力減少的比例就越微小，故而由圖中可看出 H 越大，則兩種條件所計算的理論值結果差異也越小；另外當微流道間隙高度 h 越小時，則流入微流道內矽油的體積相對的減少，致使儲液槽內矽油高度的下降量相對的也越小，故由表中亦可看出隨著 h 的減小，兩種條件下所計算的理論值亦更趨近流動時間之差異愈大，流動時間愈久。

圖 3-5 結果之比較，影響微流道內矽油流動時間變化的主要因素為微流道間隙高度 h 與液靜壓高度 b ；另外微流道間隙高度 h 亦是影響儲液槽內矽油高度變化的另一主要因素，即微流道間隙高度越大時，則流入微流道中的矽油越多，相對的在儲液槽內矽油高度的下降量也越大；

此儲液槽高度 H 、微流道間隙高度 h 與儲液槽長度 b 之關係，在本研究中由於儲液槽長度 $b=1.3\text{cm}$ ，且微流道間隙高度最大者僅為 $h=0.2\text{mm}$ ，故而實際流入微流道內之矽油的量極少，在此情形下儲液槽內矽油高度的變化量相當微小；所以考慮儲液槽高度 H 為定值與隨微流體流動而變化的理論計算結果，兩者之間僅有些微的差異。

由圖中顯示微流道間隙 h 愈小，毛細力作用愈大，流動時間愈長，且間隙大小與 H 大小(液靜壓高度)較無關係，所以流動時間在微流道時毛係自作用較明顯且在 $H=0$ 時流動時間由 200secs 升至 1480secs。

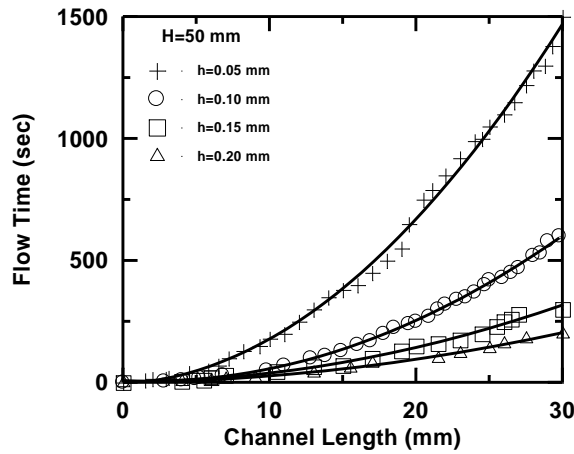


圖 3-4 不同微流道間隙對流動時間關係

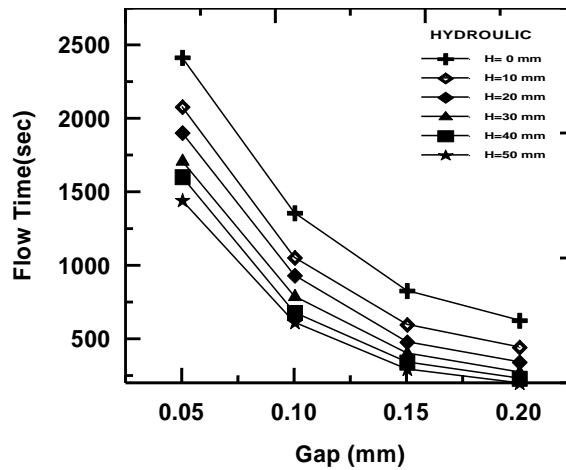


圖 3-5 不同微流道間隙液靜壓高度，對微流道流動時間影響

3.3 微流道粗糙度之影響

本實驗使用三種不同加工方式製作出不同粗糙度的模型，以探討在不同粗糙度下微流體的流動現象及流動時間，圖 3-6 顯示為雷射加工模型及 SU-8 光阻製程模型在不同重力驅動力條件下之實驗結果，另外微輪磨加工模型之實驗結果，圖中顯示大部份實驗所得之流動完成時間與平均值之誤差均在 5% 以內；為三種不同粗糙度表面之微流道於流動完成所需之時間的比較結果，可知在不同重力條件下均有一共同趨勢，即雷射加工之微流道所需的流動時間最少，而 SU-8



光阻微流道所需的流動時間最大，此與 Wenzel 及 Cassie 之論點相符合，即當微流道之表面粗糙度越大將使親水表面越親水，此現象將導致對流動具有加強效果，而使矽油在粗糙度最大的雷射加工微流道中流動最快；另外為了解在微流道內流動時間的變化趨勢，亦擷取流動實驗過程中各個時間點所對應的流動距離，由結果顯示在儲液槽內矽油高度 $H=2\text{mm}$ 時，此三種微流道模型之流動時間曲線並沒有太大差異，而在其他各種矽油高度設定時，其流動時間曲線大致上均依循粗糙度越大，則所需的流動時間越短；由圖 3-7(a)(b)顯示中亦顯示出隨著儲液槽內矽油所設定的高度越高，三種不同粗糙度表面微流道所需的流動時間差異越大。

另外，觀察微流體的波前流動狀況，可看出在 SU-8 光阻微流道內波前最平滑且對稱，而雷射加工因粗糙度較大而導致波前最不平滑及不對稱，其流動波前形狀如圖 3-8 所示。

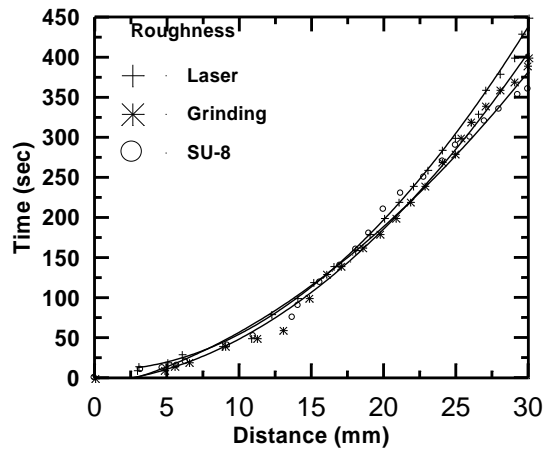
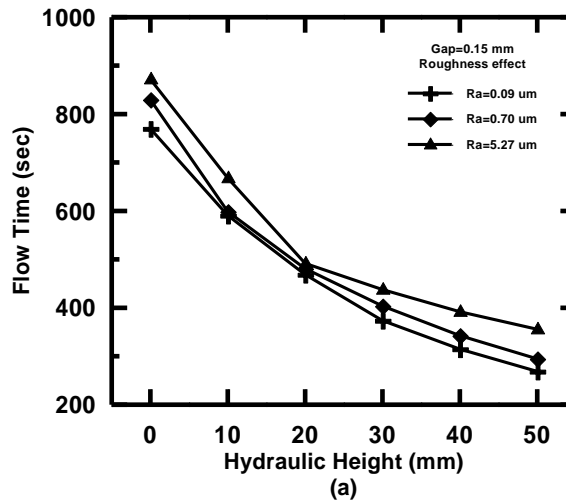


圖 3-6 儲液槽高度 $H=3\text{cm}$ 時之實驗流動時間曲線圖



(a)

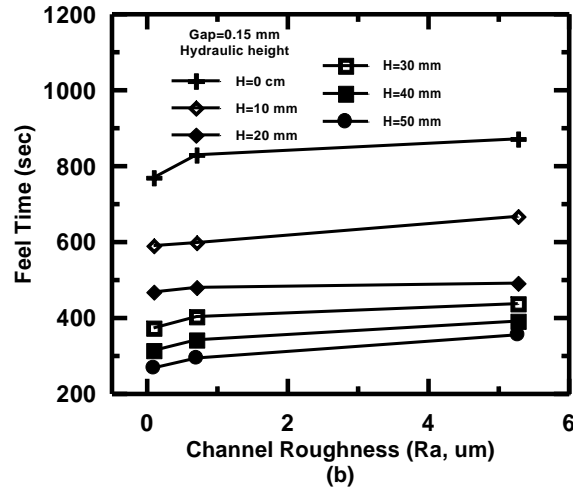
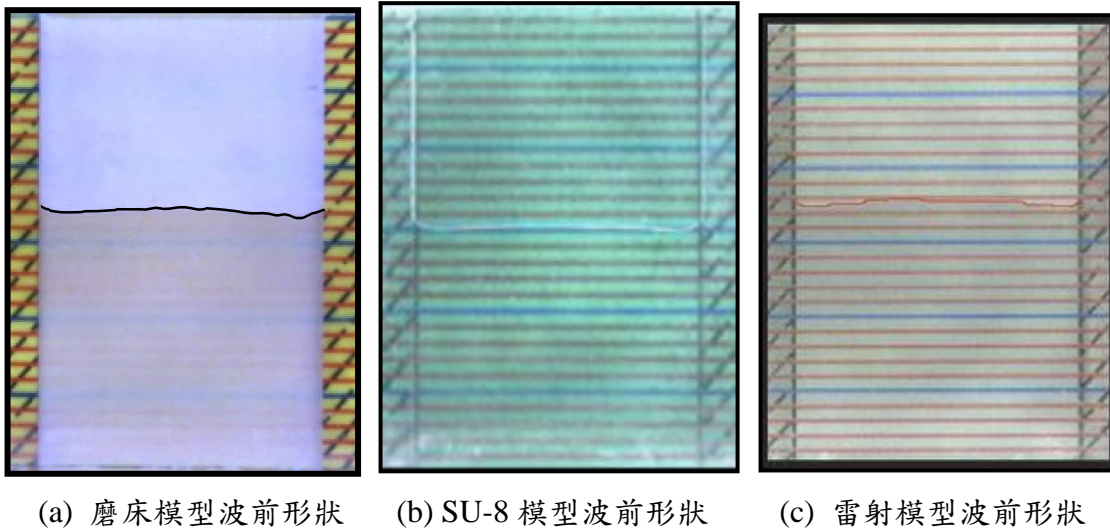


圖 3-7 (a)不同粗糙度和(b)液靜壓高度對流道流動時間影響



(a) 磨床模型波前形狀 (b) SU-8 模型波前形狀 (c) 雷射模型波前形狀

圖 3-8 三種不同粗糙度加工模型微流體的波前形狀

3.4 微流道流動時間的田口分析

本實驗中選擇三個主要的微流道參數進行田口實驗計劃法實驗探討，分別為液靜壓高度(10~50mm, H)、流道間隙(0.1~0.2 mm, h)、流道粗糙度(0.07~5.27 μm , Ra)，依田口實驗計劃法的L9 直交表，分別設定為三個水準(levels)，實驗觀察值為微流道流動時間。

分析結果如表 8 表示微流道流動時間之變異數分析(ANOVA)，圖 3-9 則為微流道流動時間之 S/N ratio 回應圖。由表 8 的變異數分析(ANOVA)的結果顯示，在所選定液靜壓高度(H)、流道間隙(h)、流道粗糙度(Ra)等三個主要加工參數中，對微流道流動時間影響最為顯著的加工參數為流道間隙(h)和液靜壓高度(H)。根據圖 3-9 微流道流動時間之 S/N ratio 回應圖，可以知道影響其放電表面刻痕的主要因素，包括了 H、h 以及 Ra，當加工條件參數設定為 H (50 mm)、h (0.2 mm) 以及 Ra (5.27 μm) 時，微流道流動時間會比較縮短。



表 3-1 微流道流動時間之變異數分析

Parameters	DOF	Sum of Sqr	Variance	Contribution
(A)	(f)	(S)	(V)	(%)
H	2	54.092	27.046	12.056
h	2	389.45	194.725	86.804
Ra	2	3.253	1.626	0.725
E1	2	1.854	0.927	0.413

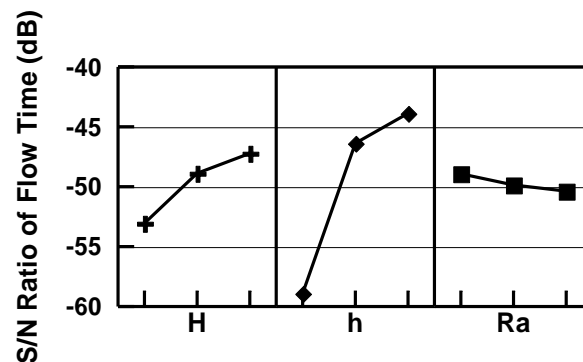


圖 3-9 微流道流動時間之 S/N ratio 回應圖

四、結論

1. 微流體所需的流動時間與流動距離的平方成正比，且當微流道間隙高度 h 越小時，所需的流動時間越久。
2. 影響儲液槽內矽油高度變化的主要因素為微流道間隙高度 h 與儲液槽長度 b ，於本文的研究中考慮儲液槽高度 H 為定值與隨微流體流動而變化的理論計算比較結果，兩者間僅有些微的差異。
3. 當微流道間隙高度 h 值越小時，重力的驅動力對微流體流動的影響則越小，即毛細力成為驅動微流體前進的主要動力來源。
4. 由本文之實驗結果與驗證可提供一些有用的資訊來輔助微流體系統的應用；即若欲提高微流體的流動速度，可適當的加入其他的外力來與毛細力共同驅動。
5. 矽油在粗糙度最大的雷射加工模型中流動最快，即粗糙度越大、流動越快，則所需的流動時間越短，此與 Wenzel 及 Cassie 之論點相符合。
6. 隨著儲液槽高度越高，三種不同粗糙表面微流道所需的流動時間差異越大。
7. 在 SU-8 光阻微流道內波前最平滑且對稱，而雷射加工因粗糙度較大而導致波前最不平滑及不對稱。

五、參考文獻

- [1] M. J. Norris, "Dispensing Flip Chip Underfill Process Problems and Solution", 22nd IEEE/CPMT International, pp. 119-124, 1998.
- [2] S. Han, K. K. Wang, "Study on the Pressurized Underfill Encapsulation of Flip Chip", IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B, Vol. 20, No. 4, pp. 434-442, 1997.
- [3] R. Darveaux, K. Banerji, "Fatigue Analysis of Flip Chip Assemblies Using Thermal Stress Simulations and a Coffin-Manson Relation", 41st Electronic Components and Technology Conference, pp. 797-805, 1991.
- [4] H. Doi, K. Kawano, A. Yasukawa, "Reliability of Underfill Encapsulate Flip Chip Packages", Application of Fracture Mechanics in Electronic Packaging, EEP-Vol.20, pp. 7-14, 1997.
- [5] C. P. Yeh, W. X. Zhou, K. Wyatt, "Parametric Finite Element Analysis of Flip Chip Reliability", The International Society for Hybrid Microelectronics, Vol.19, No.2, pp. 120-127, Second Quarter, 1996.
- [6] B. Han, P. Kunthong, "Micro-Mechanical Deformation Analysis of Surface Laminar Circuit in Organic Flip-Chip Package: An Experimental Study", Transactions of the ASME, Vol. 122, pp. 294-300, Dec. 2000.
- [7] 鍾文仁, 陳佑任, "IC 封裝製程與 CAE 應用(修訂版)", 全華科技圖書有限公司, 94 年 5 月。
- [8] T. P. Cotter, "Proceedings and Prospects of the Micro Heat Pipe", Proceedings the 5th International Heat Pipe Conference, Tsukuba, Japan, pp. 328-335, 1984.
- [9] B. R. Babin, G. P. Peterson, and D. Wu, "Steady-State Modeling and Testing of a Micro Heat Pipe", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 112, pp. 595-601, 1990.
- [10] H. B. Ma, G. P. Peterson, "The Heat Transport Capacity of Micro Heat Pipes", ASME Journal of Transactions, Vol. 120, pp. 1064-1071, 1998.
- [11] P. Gravesen, J. Branebjerg, O. S. Jensen, "Microfluidic-a Review", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 3, pp. 168-182, 1993.
- [12] S. Shoji, "Microfabrication Technologies and Micro Flow Devices for Chemical and Bio-Chemical Micro Flow System", Microprocesses and Nanotechnology, pp. 72-73, 1999.
- [13] L. J. Kricka, "Miniaturization of Analytical Systems", Clinical Chemistry, Vol. 44, pp. 2008-2014, 1998.
- [14] 李國賓, "微流體生醫晶片", 科學發展, 385 期, pp. 72-77, 2005 年 1 月。
- [15] W. Ehrfeld, K. Gebauer, V. Hessel, H. Lowe, T. Richter, "Characterization of Mixing in Micromixers by a Test Reaction: Single Mixing Units and Mixer Arrays", Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 38, pp. 1075-1082, 1999.
- [16] J. T. Groves, N. Ulman, S. G. Boxer, "Micropatterning of Fluid Lipid Bilayer on Solid Supports", Science Vol. 275, pp. 651-653, 1997.
- [17] J. K. Jun and K. C. Jin, "Valveless Pumping Using Traversing Vapor Bubble in Microchannels", J. Applied Physics, Vol. 83, No. 11, pp. 5658-5664, 1998.
- [18] P. F. Man, C. H. Mastrangelo, M. A. Burns, and D. T. Burke, "Microfabricated Capillary-Driven Stop Valve and Sample Injector", International Conference on Micro Electromechanical Systems, pp. 45-50, 1997.
- [19] G. Blankenstein, U. D. Larsen, "Modular Concept of a Laboratory on a Chip for Chemical and Biochemical Analysis", Biosensors and Bioelectronics, Volume 13, No. 3-4, pp. 427-438, 1998.
- [20] R. Lucas, "Ueber das Zeitgesetz des kapillaren Aufstiegs von Flüssigkeiten", Colloid & Polymer Science,



Vol. 23, No. 1, pp. 15-22, 1918.

- [21] E. W. Washburn, "The Dynamics of Capillary Flow", *The Physical Review*, 17(3), pp.273-283, 1921.
- [22] M. K. Schwiebert and W. H. Leong, "Underfill Flow as Viscous Flow Between Parallel Plates Driven by Capillary Action", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part C*, Vol. 19, No.2, pp.133-137, April 1996.
- [23] S. Han and K. K. Wang, "Analysis of the Flow of Encapsulant During Underfill Encapsulation of Flip-Chips", *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B*, Vol. 20, No.4, pp.424-433, Nov. 1997.
- [24] G. Ni, M. H. Gordon, W. F. Schmidt, and A. Muyschondt, "Experimental and Numerical Study of Underfill Encapsulation of Flip-Chips Using Conductive Epoxy Polymer Bumps", *IEEE Electronic Components, and Technology Conference*, 47th, pp.859-865, 1997.
- [25] L. T. Chen, "The Study of Underfill Phenomena of Flip-Chips Packages", Master Thesis, Chung Yuan Christian University, July 2001.
- [26] C. H. Chang, "Mold-Flow Analysis of High-Density IC Encapsulation", Master Thesis, Chung Yuan Christian University, Aug. 2002.
- [27] H. W. Liu, "Molding and Wire-Sweep Analysis of IC Encapsulation", Master Thesis, Chung Yuan Christian University, Jul. 2003.
- [28] P. Y. Wu, W. A. Little, "Measurement of Friction Factor for Flow of Glass in Very Fine Channels Used for Microminiature" *Joule-Thompson Refrigerators, Cryogenics* 24(8) , pp. 273-277, 1983.
- [29] J. Harley, H. Bau, "Fluid Flow in Micron and Submicron Size Channels", *IEEE Trans. THO249-3*, pp. 25-28, 1989.
- [30] Gh. Mohiuddin Mala, Dongqing Li, "Flow Characteristics of Water in Microtubes", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 20, pp. 142-148, 1999.
- [31] J. Pfahler, J. Harley, H. H. Bau, and J. Zemel, "Liquid and Gas Transport in Small Channels", *ASME Proc., DSC*, Vol. 19, Winter Annual Meeting, Dallas, p. 149, 1990.
- [32] D. Yu, R. Warrington, R. Barron, and T. Ameel, "An Experimental and Theoretical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in Microtubes," *Pro. of the ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, Maui, HI, 1, p. 523, 1995.
- [33] X. F. Peng, G. P. Peterson, "Convective Heat Transfer and Flow Friction for Water Flow in Microchannel Structure", *International Journal of Heat and Mass transfer*, Volume 39, No. 12, pp. 2599-2608, 1996.
- [34] R. N. Wenzel, "Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water", *Industrial and Engineering Chemistry*, pp. 988-994, Vol. 28, 1936.
- [35] A. B. D. Cassie, S. Baxter, "Wettability of Porous Surfaces", *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 40, pp. 546-551, 1944.

Abstract

In recent years, because of the rapid development of MEMS and micromachining, many applications of the capillary flow is widely developing in some modern processes, such as underfilling of flip chip, flow in microfluidic chip or biochip, and a variety of other fields.

In this paper, Then flows in rectangular microchannels driven by capillary force and gravity are discussed. Finally, the influence of surface roughness in microchannel is studied, we utilize carbon dioxide laser, the microgrinding processing and SU-8, in order to separately make the detailed tangent plane (roughness $2.0\sim 6.3\ \mu m$),; furthermore, the theoretical model of flow in microchannel driven by capillary force and gravity is formulated from the Navier-Stokes equations. A close form solution to predict flow time was developed, and experiments have been fabricated to investigate and verify the flow times in microchannel. From the results, the predicted flow times show reasonably good agreement with the corresponding experimental flow times. Moreover, when the microchannel height is small, the effects of gravity force becomes less obvious, namely the capillary force becomes the dominate source to drive microfluidic. The precise tangent plane (roughness $0.25\sim 1.6\ \mu m$), and the smooth tangent plane (roughness $0.01\sim 0.20\ \mu m$) of the acrylic microchannel, and the experiment modules are built and the height of silicone oil in reservoir is changed, in order to figure out the influence of different surface roughness on the flowing time of the microfluidic. From the results, it shows that the surface roughness is increased, then the flow time is less, and the flow-front of microfluidic becomes more unsteady.

Key words:Capillary Phenomena · Microfluidic · Surface Roughness

